基于 AnyBody 仿真的八段锦动作下肢生物力学特征研究

庞博[1],张子华[2],纪仲秋[1]

(1. 北京师范大学体育与运动学院,100875 北京;2. 铜仁学院大健康学院,554300 铜仁)

摘　要:为揭示八段锦初学者练习 14 周前后和专业者八式动作的不同动作特征,以红外捕捉测试系统、三维测力台、表面肌电测试系统,采集八段锦动作数据,以 AnyBody 7.0 建模系统计算八段锦动作的膝关节动力学、肌肉激活度参数。结果表明:八段锦干预可改善膝关节力量和稳定程度;不同动作的肌纤维参与活动收缩情况不同,产生的肌肉激活度不同,胫骨前肌、股直肌、腓肠肌、股二头肌分别在第二式、第三式、第五式、第七式时的肌肉激活度最高;初学者可针对不同动作影响刺激的肌肉,有针对性的区分练习,提高八段锦锻炼的科学性。研究成果证实了八段锦不同动作的膝关节动力学差异,计算出不同肌肉激活度特点,对指导初学者练习八段锦具有重要的意义。

关键词:八段锦;AnyBody 仿真;生物力学

中图分类号:R318.01　　**文献标志码:**A

Biomechanical characteristics of lower limbs in Baduanjin based on AnyBody simulation

PANG Bo[1],ZHANG Zihua[2],JI Zhongqiu[1]

(1. School of Physical Education and Sports,Beijing Normal University,100875 Beijing,China;
2. College of Health,Tongren University,554300 Tongren,China)

Abstract: To reveal the different movement characteristics of Baduanjin before and after 14 weeks' training between beginners and professionals,the infrared capture test system,three-dimensional dynamometry,and surface electromyography test system were used to collect Baduanjin movement data. AnyBody 7.0 Modeling System was used to calculate the knee joint dynamics and muscle activation parameters of Baduanjin movement. The results show that Baduanjin intervention can enhance the strength of knees and stability of lower limb joints,muscle fibers of different movements participate in different contractions,and the muscle activation degree is different. The muscle activation degree of tibialis anterior,rectus femoris,gastrocnemius and biceps femoris is the highest in the second,third,fifth and seventh movements,respectively. Beginners can adopt different actions to affect the stimulation of the muscles,and improve the scientificity of Baduanjin exercise. The research results of this paper have verified the dynamic differences of knee joints of different movements in Baduanjin,and calculated the characteristics of different muscle activation,which is of

收稿日期:2021-11-05　　**修回日期:**2022-04-15
基金项目:国家社科基金资助项目(No. 20BTY070)
通信作者:纪仲秋。E-mail:jizhongqiu61@bnu.edu.cn
引用格式:庞博,张子华,纪仲秋. 基于 AnyBody 仿真的八段锦动作下肢生物力学特征[J]. 应用力学学报,2023,40(1):234-240.
PANG Bo,ZHANG Zihua,JI Zhongqiu. Biomechanical characteristics of lower limbs in Baduanjin based on AnyBody simulation[J]. Chinese journal of applied mechanics,2023,40(1):234-240.

great significance in guiding beginners to practice Baduanjin.

Key words: Baduanjin; AnyBody simulation; biomechanics

近年来,随着人们物质生活水平显著性提高,对健康层面的需求日益提高,积极参与体育运动的人越来越多。八段锦历史源远流长,融入中华民族传统养生文化的智慧,是独立而完整的医疗健身功法,古人常用来防治疾病。八段锦的“八”不但是八段动作,还特指八卦的“八”,能整体运作、周期循环,“锦”指丝帛锦缎等贵重、精美物品,将上等纺织品与导引术结合,寓意为吉祥高贵的运动。八段锦由八种相对独立、完整、细腻、流畅的动作组成,各式动作均对应特定脏腑[1],在我国民族传统体育项目中广泛流传,八段锦依靠重心转换和支撑动作提高平衡能力和灵敏性,提升脊柱旋转能力。相对于其他传统体育锻炼方式,可放松身心,调节呼吸,强身健体,增加体质和抵抗力,提升心肺功能、耐力、柔韧素质,培养自信、勇敢、拼搏向上、自律的精神,改善身体机能。八段锦是实现身体姿势、动作、呼吸和冥想相结合的身心协调方式[2],是机体内外全面调养的健身功法,被视为中医养生与疾病防治的重要理疗手段[3]。八段锦练习时,人体为保持重心稳定需要双足支撑,长期双足支撑的练习方式充分锻炼了下肢稳定程度。目前,国内外对八段锦的研究分析尚不多见。虽有试验证实其临床效果[4],但以往在验证其动作特征及干预效果方面的研究极少,本研究通过揭示八段锦干预练习者14周前后各项生物力学指标变化及与专业组的差异,分析其动作特征,旨在为在健康中国及体育强国背景下人们以八段锦为手段科学健身及设定运动处方提供理论依据。

1 研究对象与方法

1.1 研究对象

招募青年男性为测试对象,实验组为参加八段锦课的普通大学生,专业组为长期练习八段锦的大学生,练习时长超过3年。受试者肢体能自由活动,基本情况见表1。

表1 基本信息

Tab.1 Basic information

组别	人数	年龄/y	身高/m	体质量/kg	BMI
实验组	30	21.71±1.24	1.76±0.04	73.52±5.64	22.08±1.45
专业组	30	20.55±1.08	1.77±0.03	73.46±7.31	22.71±1.58

1.2 干预方案

八段锦按照2003年国家体育总局健身气功管理中心颁布的《健康气功八段锦标准》,对受试者进行八段锦动作干预,频率为每周至少2次,每次45 min,保证运动安全有效,共14周。

1.3 数据采集

在实验开始测量前,受试者换上统一运动服装。测试者为受试者贴点标记。用Kistler测力台和捕捉软件BTS SMART Capture进行校准,连接BTS红外运动捕捉系统和8台高速摄像机对受试者的动作进行捕捉拍摄,测试前使用三维标定框架对测试场地进行扫描,排除反光标识物对测试过程的干扰。放置25枚反射标志物对受试者按照人体仿真标准模型进行标记(表2),告知受试者站于三维测力台上面,通过红外高速摄相机来扫描标志点的位置,记录标志点位置的变化特征,得出动力学参数。

表2 反光标记物点名称及位置

Tab.2 Name and location of reflection marker points

名称	位置	名称	位置	名称	位置
RFHD	头前部右侧	RPSI	右髂后上棘	LHEE	左侧脚后跟
LFHD	头前部左侧	LPSI	左髂后上棘	RANK	右侧外踝
RBHD	头后部右侧	RTHI	右侧大腿外侧	LANK	左侧外踝
LBHD	头后部左侧	LTHI	左侧大腿外侧	RTOE	右第一跖骨
CLAV	锁骨中点	RKNE	右腓骨外上髁	LTOE	左第一跖骨
T10	第10胸椎	LKNE	左腓骨外上髁	RMT5	右第五跖骨
STRN	胸骨剑突	RTIB	右侧小腿外侧	LMT5	左第五跖骨
RASI	右髂前上棘	LTIB	左侧小腿外侧		
LASI	左髂前上棘	RHEE	右侧脚后跟		

1.4 表面肌电测试

测试环境要求去噪静音,找准待测位置皮肤,由于体毛多会影响结果,故对测试部位进行剃毛处理,测前以75%脱脂酒精棉对电极安放位置去脂处理,顺着肌腹粗隆位置走向粘贴Ag/AgCl表面电极片在肌腹中央,记录3次试验的胫骨前肌、腓肠肌、股外侧肌、股二头肌的表面肌电值。取右侧优势腿的完整支撑期与摆动期时相的肌电峰值进行分析,用

BTS SMART Analyzer 软件处理数据。

1.5 数据处理

将 BTS SMART Capture 捕捉到的. tdf 格式用 BTS tracker 进行处理. c3d 格式文件，然后导入到 AnyBody 7.0 软件中，先将 AnyBody 7.0 的 standing model 进行修改，导入每例受试者身高、体重、头部和身躯的高度、头的宽度、踝髋之间的距离、膝宽、腿长、髋深和骨盆宽、踝宽等一系列身体形态学数据。矢状轴是人体进行前后运动的水平轴，额状轴是人体进行左右运动轴，垂直轴是人体进行上下运动的轴。以下是肌肉最大力的计算函数：即最小化进行动作所需的肌肉活动、肌肉调动和目标函数 G。具体处理流程见图 1。

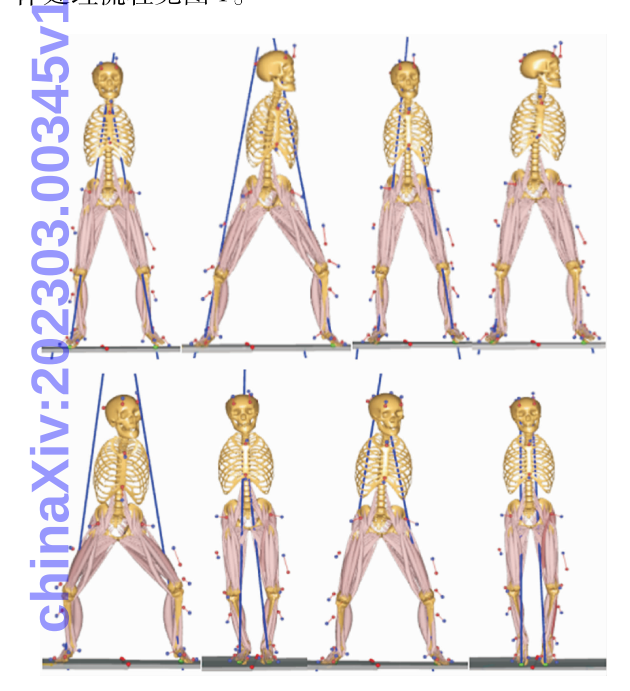


图 1　八段锦动作肌肉仿真示意图

Fig. 1　Muscle simulation diagrammatic sketch of Baduanjin

其计算公式为

目标函数

$$G(f_i^M) \tag{1}$$

约束条件

$$\boldsymbol{C}f = d \tag{2}$$

$$f_i^M \geqslant 0,\ i \in \{1,2,\cdots,n^M\} \tag{3}$$

肌肉募集

$$\min G(f^M) = \max(A_i^M) = \max\left(\frac{f_i^M}{N_i}\right)^P \tag{4}$$

P 介于 1 ~5 之间

$$\boldsymbol{C}f^M = R,\ 0 \leqslant f_i^M \leqslant N_i,\ i \in \{1,2,\cdots,n^M\} \tag{5}$$

肌肉活性 a_i

$$a_i = \left(\frac{f_i^M}{N_i}\right),\ i \in \{1,2,\cdots,n^M\} \tag{6}$$

其中：$\boldsymbol{C}$ 是系统矩阵；d 是人体系统外力；f_i 是个体在某段时间运动时肌肉 i 的力量；f_i^M 是最大肌肉力；N_i 是单块肌肉的拉伸强度，代表肌肉在最佳的长度情况下所能提供的最大力量；A_i^M 是肌肉活动度，代表肌肉力与肌肉强度比值；R 是地面反作用力；n^M 是肌肉数目。

1.6 统计学处理

以 SPSS 26.0 统计软件对八段锦干预 14 周前后的指标进行数理统计学分析，以独立样本 t 检验法来比较指标差异。对积分肌电值与肌肉力值进行相关性分析。

2 研究结果

如表 3 和图 1 所示，对八段锦时相进行划分，记录八段锦运动过程的下肢动力学参数。

表 3　八段锦时相划分阶段定义

Tab. 3　Definition of the phase division of Baduanjin

名称	八段锦动作要领
第一式	两脚分开，与肩同宽，腰脊放松，屈膝双手托举，伸膝双手落下，并屈膝。
第二式	左脚向左迈一步，下蹲成马步，马步转换为自然直立，右脚右迈一步，下蹲成马步后自然直立。
第三式	两脚分开，屈膝成马步，马步转换为自然直立，自然直立转换成马步。
第四式	两脚分开，下蹲成马步，向左缓缓转体，再向右缓缓转体。
第五式	两脚分开，下蹲成马步，躯干左转至左侧，由右平转至右侧，立身回正。
第六式	两脚分开，躯干前俯，两膝微屈，双手顺势由体后向前攀足，躯干缓缓直起，自然直立。
第七式	左脚向左迈一步，屈膝成马步，双腿分开，左膝朝前用力，立身回正，右膝朝前用力，立身回正。
第八式	两脚分开，两脚跟向上提踵，稍作停顿，两脚跟下落着地七次。

注：第一式，双手托天理三焦；第二式，左右开弓似射雕；第三式，调理脾胃须单举；第四式，五劳七伤往后瞧；第五式，摇头摆尾去心火；第六式，双手攀足固肾腰；第七式，攒拳怒目增气力；第八式，背后七颠百病消（下同）。

2.1 膝关节动力学参数结果

如图 2 和表 4 所示，同本组后测及专业组相比，

干预显著提高实验组第二、六式膝关节矢状轴受力，第四式膝关节垂直轴受力（$P<0.05$）；显著降低第五式膝关节额状轴受力（$P<0.05$）。

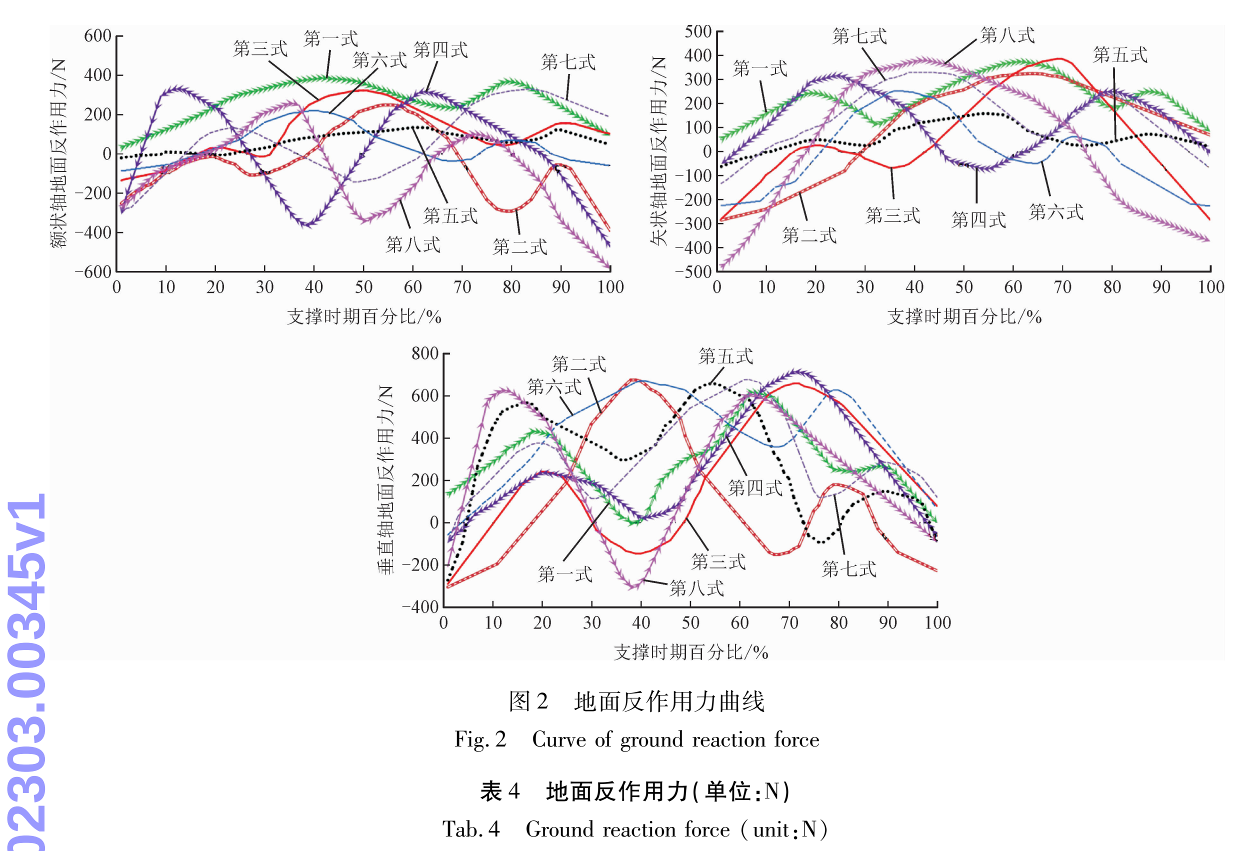


图 2　地面反作用力曲线

Fig. 2　Curve of ground reaction force

表 4　地面反作用力（单位：N）

Tab. 4　Ground reaction force (unit: N)

参数	组别	第一式	第二式	第三式	第四式	第五式	第六式	第七式	第八式
矢状轴	EG1	373.5 ±44.3	277.2 ±69.3	383.8 ±40.3	303.6 ±32.9	144.1 ±50.6	236.0 ±21.5	307.3 ±42.5	377.9 ±35.7
	EG2	374.2 ±31.8	320.5 ±56.8*	385.2 ±46.1	312.5 ±28.4	152.2 ±43.8	249.2 ±28.3*	317.6 ±43.1	378.6 ±26.1
	PG	374.6 ±40.2	323.9 ±66.7#	386.4 ±53.9	315.4 ±33.7	156.5 ±42.4	252.7 ±30.4#	329.8 ±45.0	379.8 ±23.2
垂直轴	EG1	607.3 ±51.9	659.5 ±60.4	635.9 ±77.2	641.8 ±93.5	650.6 ±47.5	660.9 ±53.1	663.9 ±32.4	599.2 ±38.5
	EG2	608.1 ±43.2	669.7 ±55.1	644.0 ±54.8	699.9 ±82.6*	655.1 ±61.3	665.4 ±57.2	666.8 ±33.5	601.4 ±37.3
	PG	609.2 ±46.5	672.2 ±58.3	655.3 ±66.2	708.2 ±99.7#	658.2 ±65.4	672.8 ±60.3	670.1 ±34.9	604.6 ±32.9
额状轴	EG1	390.4 ±32.0	249.2 ±35.4	321.3 ±28.7	336.7 ±29.2	157.3 ±22.5	224.2 ±35.7	358.0 ±26.7	249.2 ±30.5
	EG2	389.6 ±31.3	247.8 ±29.2	320.5 ±36.1	331.6 ±35.8	143.0 ±27.1*	222.0 ±36.2	340.4 ±23.1	247.8 ±25.6
	PG	382.7 ±25.5	246.8 ±31.5	318.8 ±25.4	328.4 ±30.5	138.4 ±36.0#	218.4 ±33.1	326.9 ±25.8	246.3 ±21.4

注：* 表示实验组干预前后 $P<0.05$，# 表示实验组干预前与专业组 $P<0.05$。

2.2　神经肌肉调控能力的验证

AnyBody 下肢模型在计算步态等动作中的生物力学参数中具有很高的有效性[5]。本研究对八段锦的肌肉激活度和积分肌电值结果进行比较，并进行相关性分析。图 3 是表面肌电和肌肉激活度的结果，显示下肢 iEMG 活动的影响取决于动作类型，第二式胫骨前肌 iEMG 最大，第三式股直肌 iEMG 最大，第五式腓肠肌 iEMG 最大，第七式股二头肌 iEMG 最大。对相关度用 t 检验进行评估[6]，验证 AnyBody 仿真计算得出的肌肉激活度与积分肌电值显著正相关。

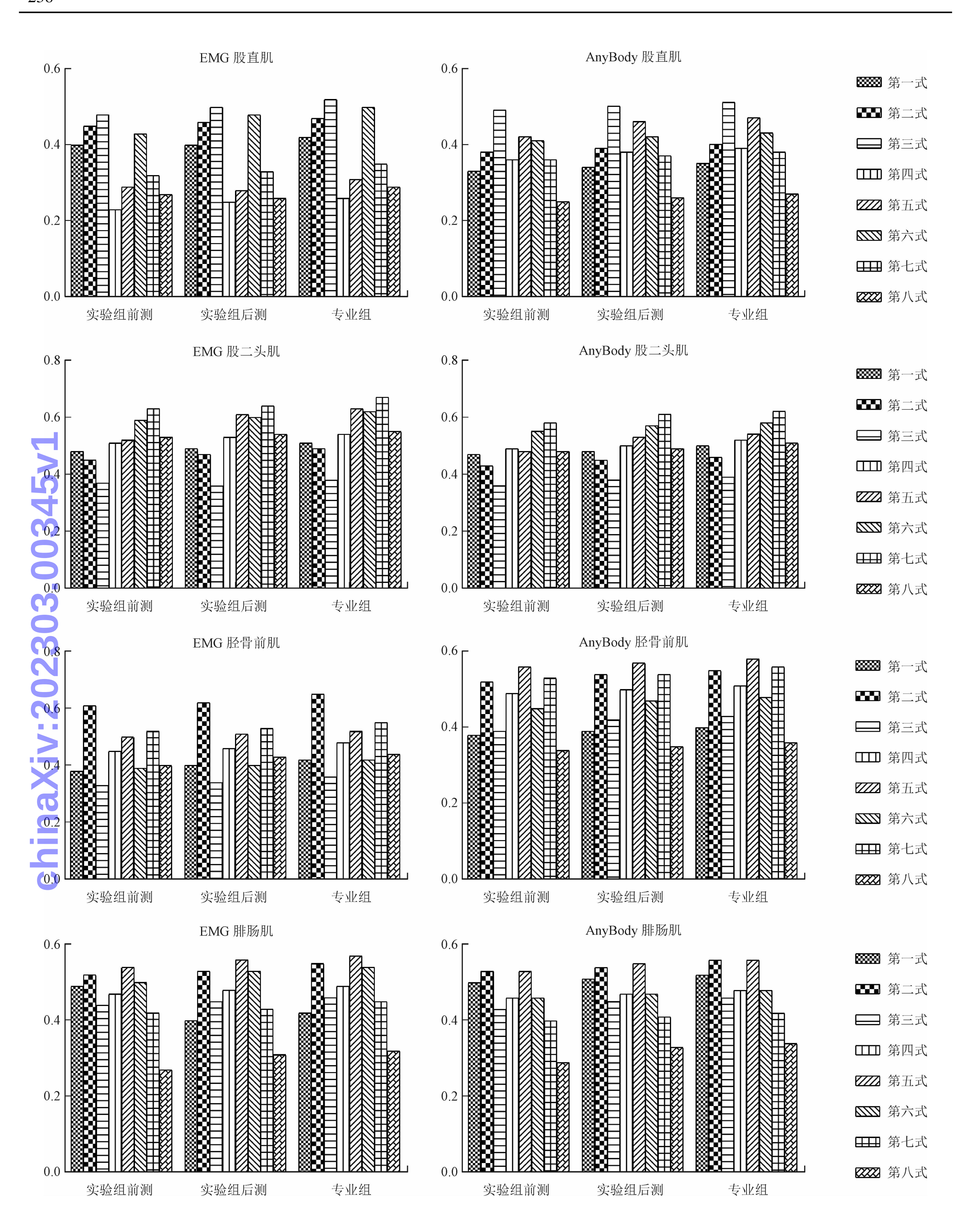


图 3　肌电图与肌肉活动度的比较

Fig. 3　Comparison of EMG and muscle activity

3 讨 论

八段锦强调形气神结合、动作柔缓、动静相兼、强度适中、连贯灵活，易于锻炼者长期坚持，时常练习可减轻肌肉疼痛，通过主动运动脊柱、上下肢等，牵拉软组织，改善睡眠机能[7]。八段锦动作对称，练习者要在松髋、屈膝的动作转换时完成支撑腿及摆动腿的重心转换，下肢长时间交替负重，腿部肌群持续收缩舒张[8]，长期练习有助于练习者提高对动作速度、轨迹等感知能力。国内外对八种动作特征分析的研究极少，当前八段锦研究的受试主体几乎全部为老年人，研究重点在疾病防治上，本研究通过揭示八段锦干预练习者 14 周前后各项生物力学指标变化，分析其动作特征，为在健康中国及体育强国背景下人们以八段锦为手段科学健身及设定运动处方提供理论依据。

3.1 下肢关节动力学参数讨论

八段锦具有膝深屈、宽步长特点，可提高单脚支撑稳定性，八段锦练习在手眼配合，上下肢协调工作的过程中大脑神经系统与肢体肌肉协调工作的能力也得以练习。八段锦不断屈膝松胯，重心起伏下沉，充分调节身体稳定机制，长时间练习可形成运动规律。八段锦动作呈现左右、前后的对称性，其重心移动通过下肢关节不断变化方向而完成。膝关节受力方面，第二式由直立到马步过程中，膝关节经历了由左前向至左侧向移动、由左侧向至左前移动、回正、由右前向至右侧向移动、由右侧向至右前移动，长期练习增加矢状轴受力。第四式动作由直立转换至马步下蹲，膝关节屈曲，经向左屈曲、回正伸直、向右屈曲、回正伸直，不断刺激膝关节在垂直轴方向上的受力。第五式动作膝关节由伸展至屈曲，然后在膝关节屈曲的马步基础上完成前后左右四个方向的运动，初学者初步学习时，下蹲力量通常掌握不好，膝关节在额状轴受力过大，这种动作完成建立在屈曲的马步状态下，长期练习会稳定膝关节在额状轴受力，降低多余力。第六式动作，双手攀足时膝关节充分伸展，比自然伸展时用力要更多才能完成攀足的动作，因此明显提升膝关节矢状轴受力。八段锦使下肢关节微曲舒展，降低身体重心，以缓慢稳定的姿势由一种位置过渡到其他位置，前后或中外侧向的重心轨迹路线一致，有利于均衡提高身体在各方向上的平衡，降低骨骼肌黏滞，矫正错误姿势，在改善平衡、灵活度方面有较好效果[9]。

3.2 下肢关节肌肉激活度讨论

表面积电信号是肌肉在不同收缩时期不同运动单位表现的结果[10]，表面肌电 iEMG 可反映一定时间内运动单位总数量及每个肌电单位的放电值[11]。有研究表明[12-14]，AnyBody 软件建立人体肌肉骨骼模型进行逆向动力学分析仿真运算与肌肉激活时肌电水平测试结合，共同验证模型有效性及相关程度，结果发现二者具有一定的相关性。本研究发现 iEMG 值与肌肉激活度呈正相关关系，与 DAMSGAARD等[12]研究结果一致。

初学者可针对不同动作影响刺激的肌肉，有针对性的区分练习，提高八段锦锻炼的科学性。基于人体下肢肌肉力量强度、韧带强度具有差异，加之八段锦套路众多，日常以八段锦或其他锻炼情况存在差异，所以动作习惯、重心移动稳定性、神经控制能力有差异，因此要进一步深究不同年龄段人群、不同疾病患者之间的动作对比分析。

4 结 论

本研究以红外捕捉测试系统、三维测力台、表面肌电测试系统，采集八段锦动作数据，以建模系统计算八段锦动作的下肢动力学、肌肉激活度参数。对指导初学者练习八段锦具有重要的意义。得到的主要结论如下。

1）八段锦可提高初学者第二、六式膝关节矢状轴受力，第四式膝关节垂直轴受力；显著降低第五式膝关节额状轴受力。

2）不同动作的肌纤维参与活动收缩情况不同，产生的肌肉激活度不同，胫骨前肌、股直肌、腓肠肌、股二头肌分别在第二式、第三式、第五式、第七式时的肌肉激活度最高。

3）初学者可针对不同动作影响刺激的肌肉，有针对性的区分练习，提高八段锦锻炼的科学性。

参考文献：

[1] 庞博，纪仲秋，张子华，等. 基于 AnyBody 仿真及有限元建模下的八段锦运动生物力学研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版)，2020，56(4)：606-615.
PANG Bo，JI Zhongqiu，ZHANG Zihua，et al. Biomechanics of Baduanjin by AnyBody simulation and finite element modeling[J]. Journal of Beijing Normal University(natural science)，2020，56(4)：606-615(in Chinese).

[2] CHENG F K. Effects of Baduanjin on mental health：A comprehensive review[J]. Journal of bodywork and movement therapies，2015，19(1)：138-149.

[3] ZHENG G H，LI M Y，LAN X L，et al. The effect of Baduanjin exercise for physical and psychological wellbeing of college students：Study protocol for a randomized controlled trial[J]. Trials，2013，14(1)：422.

[4] YE J J，ZHENG Q K，ZOU L Y，et al. Mindful exercise（Baduanjin）as an adjuvant treatment for older adults（60 years old and over）of knee osteoarthritis：A randomized controlled trial[J]. Evidence-based complementary and alternative medicine，2020，2020：9869161.

[5] PANG B，JI Z Q，ZHANG Z H，et al. Strength training characteristics of different loads based on acceleration sensor and finite element simulation[J]. Sensors，2021，21(2)：647.

[6] STAMBOLIAN D，ELTOUKHY M，ASFOUR S. Development and validation of a three dimensional dynamic biomechanical lifting model for lower back evaluation for careful box placement[J]. International journal of industrial ergonomics，2016，54：10-18.

[7] FAN B F，SONG W D，ZHANG J H，et al. The efficacy of mind-body（Baduanjin）exercise on self-reported sleep quality and quality of life in elderly subjects with sleep disturbances：A randomized controlled trial[J]. Sleep and breathing，2020，24(2)：695-701.

[8] DAI W K，WANG X W，XIE R，et al. Baduanjin exercise for cervical spondylotic radiculopathy：A protocol for systematic review and meta-analysis[J]. Medicine，2020，99(18)：e0037s.

[9] ESCAMILLA R F，FLEISIG G S，LOWRY T M，et al. A three-dimensional biomechanical analysis of the squat during varying stance widths[J]. Medicine & science in sports & exercise，2001，33(6)：984-998.

[10] URBANEK H，VAN DER SMAGT P. iEMG：Imaging electromyography[J]. Journal of electromyography and kinesiology，2016，27：1-9.

[11] HENDERSON Z J，SANZO P，ZERPA C，et al. Ankle bracing's effects on lower extremity iEMG activity，force production，and jump height during a vertical jump test：An exploratory study[J]. Physical therapy in sport，2019，37：171-178.

[12] DAMSGAARD M，RASMUSSEN J，CHRISTENSEN S T，et al. Analysis of musculoskeletal systems in the AnyBody modeling system[J]. Simulation modelling practice and theory，2006，14(8)：1100-1111.

[13] BŁAŽKIEWICZ M，WISZOMIRSKA I，KACZMARCZYK K，et al. Inter-individual similarities and variations in muscle forces acting on the ankle joint during gait[J]. Gait & posture，2017，58：166-170.

[14] KIM Y，JUNG Y，CHOI W，et al. Similarities and differences between musculoskeletal simulations of OpenSim and AnyBody modeling system[J]. Journal of mechanical science and technology，2018，32(12)：6037-6044.

（编辑　史淑英）